引文格式：张丰凡,吴昊,刘明波. 基于sDNA的路网演变及其对景观格局的影响[J]. 地理空间信息, 2024, 22(9): 67-71. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.09.014

基于sDNA的路网演变及其对景观格局的影响

张丰凡[1]，吴　昊[1]，刘明波[1]
（1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 西安市清洁能源数字化技术重点实验室，陕西 西安 710065）

摘　要：为探讨路网空间结构对景观格局的影响，以招远市为例，获取2009—2018年路网数据和土地利用数据，利用sDNA模型和路网密度计算方法，计算道路接近度和路网密度，作为道路网络结构评价指标；选取PD、ED、LPI、LSI、AI、SHDI等指数构建景观格局评价体系，从而分析城市道路网络空间结构对景观格局的影响。结果表明，2009—2018年招远市道路接近度和路网密度自中心向周围呈递减态势；研究区景观呈多样性、复杂性、破碎化发展态势，道路接近度与景观格局指数的相关性更高，因此在表征景观格局变化时，道路接近度比路网密度更加准确。

关键词：道路接近度；路网密度；景观格局；破碎化；相关性
中图分类号：TU983　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）09-0067-05

Road Network Evolution Based on sDNA and Its Influence on Landscape Pattern

ZHANG Fengfan[1], WU Hao[1], LIU Mingbo[1]
(1. Northwest Engineering Corporation Limited, Power China Group, Xi'an Key Laboratory of Clean Energy Digital Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to explore the spatial structure influence of road network on the landscape pattern, taking Zhaoyuan City as an example, based on the road network data and land-use data from 2009 to 2018, we used sDNA model and the road network density calculation method to calculate the road proximity and road network density, which as the evaluation indexes of the road network structure. We selected PD, ED, LPI, LSI, AI, SHDI and other indices to construct the landscape pattern evaluation system, so as to analyze the influence of urban road network spatial structure on landscape pattern. The result showed that the road proximity and road network density in Zhaoyuan City decreased from the center to the surrounding from 2009 to 2018. Compared with the road network density, the road proximity has a higher correlation with the landscape pattern indices, so it can be more accurate when representing the changes of landscape pattern.

Key words: road proximity, road network density, landscape pattern, fragmentation, correlation

随着道路结构的不断向外扩张[1]，道路网络向城市外圈发展，对原有生态景观格局产生驱动作用[2]。道路建设在很大程度上会分割生态系统[3]，使景观格局破碎化、分离化[4]，对生物栖息地和生态景观格局影响深远。生态景观廊道的出现将导致生物多样性下降和生态系统功能衰退等问题，因此研究道路网络变化对景观破碎化的影响，对道路建设规划与生态保护意义重大[5-6]。从人类发展历史来看，道路的出现往往带来人居适应，在选取居住地时，道路网络是需要考虑的重要因素之一。宋冰洁[7]等通过构建路网空间指数分析西安市道路网络对景观格局的影响发现，不同的道路网络发展完整程度对不同地类的影响存在差异性；杨思[8]等分析建设用地强度和林地边界长度变化发现，道路网络的扩张对建设用地规模具有强烈的驱动作用；张景华[9]等基于不同等级道路构建道路干扰指数发现，道路对其周边景观格局变化具有较强的驱动作用；牟凤云[10]等利用空间句法算法构建交通可达性模型，研究了城市路网与土地利用的协调效用；蔡雪娇[11]等利用核密度估算法探讨道路网络与景观破碎度之间的关系发现，二者存在较强的相关性。上述方法不同程度地忽略了道路作为线段模型对空间的变化作用，因此本文探讨了一种新方法，以期在表征道路空间结构变化和景观破碎化效应上具有更好的效果。

扩展空间句法（sDNA）是反映道路网络空间结构特征变化的一种新方法。空间句法的基本思想是对空间进行尺度划分[12]和空间分割[13]。sDNA模型是在空间句法的基础上强调线段模型对空间的变化作用，契合了研究道路网络对景观格局的影响；其在国内道路

收稿日期：2022-11-29。
项目来源：中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司科技资助项目（XBY-ZDKJ-2020-08）。
第一作者简介：张丰凡（1997—），助理工程师，主要研究方向为景观生态学与区域可持续发展，E-mail：978999148@qq.com。

研究的应用较少，相较于传统空间句法，sDNA与ArcGIS软件在研究道路网络方面更加契合[14]。sDNA中的路网接近度能揭示路网空间中社会因素与空间形态之间的关系，对于研究城市道路网络对景观格局的影响具有较好的相关性[15]。以往研究主要集中在大范围大尺度[16]地区，忽略了县域尺度层面的研究。近年来招远市城市扩张迅速，道路交通建设飞速发展，因此本文基于2009年、2014年和2018年招远市路网数据，首先利用sDNA模型计算道路接近度和路网密度，以分析其路网空间特征和交通网络的密集程度；然后借助Fragstats4.2软件计算招远市土地利用现状景观格局指数，以量化的方式对研究区景观格局进行分析；最后利用SPSS软件定量分析道路接近度和路网密度与景观格局指数之间的相关性，以探讨道路网络空间结构变化对生态景观格局的影响。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

招远市位于山东半岛西北部，地理范围为37°33′N、120°38′E，总面积为1 433.18 km²；东与栖霞市接壤，西与莱州市相邻，南与莱阳、莱西两市接壤，北与龙口市相接，西北濒临渤海；地形以低山丘陵为主，低山区和丘陵的面积占比分别为32.9%、38.4%；地势总体表现为中部高南北低，境内矿产资源丰富。

1.2 数据来源

土地利用数据来源于招远市第二次土地调查变更数据。以2009年、2014年和2018年为研究节点，提取土地利用调查基础数据的地类图斑和道路矢量数据，并根据GB/T 21011–2017《土地利用现状分类》，将25个二级类和6个一级类合并为草地、耕地、林地、水域、建设用地、未利用地，作为研究道路网络结构和景观格局空间结构特征及其变化的基础数据。相关社会经济数据来源于《烟台统计年鉴》和《招远统计年鉴》。

2 研究方法

2.1 道路接近度

本文以路网数据建立的线段模型为基础，以角度深度为距离成本，以 n 为搜索半径求解全局接近度，通过ArcGIS平台利用sDNA软件进行计算。在sDNA模型中，道路接近度的计算公式为：

$$\mathrm{NQPDA}(x)=\sum y\in R_X\frac{P(y)}{d(x,y)} \tag{1}$$

式中，$P(y)$ 为搜索半径 R 内节点 y 的权重；$d(x,y)$ 为搜索半径 R 内节点 x 到 y 的最短角距离。

利用式（1）计算得到路网接近度，再采用500 m×500 m的格网提取每个格网中道路接近度之和作为网格属性值，最后利用格网分析道路空间结构变化。

2.2 路网密度

路网密度是指一定范围内路网总长度与该范围面积之比，能简单直观地量化一定范围内道路规模。本文通过ArcGIS平台构建500 m×500 m格网，提取格网中区域道路总长度，求取每个格网的路网密度，从而得到2009年、2014年、2018年招远市路网密度空间分布图。

2.3 景观格局

景观格局是指生态景观的空间结构组成，通过定量数值表现景观的异质性，还可反映社会发展对生态的干扰作用。景观格局指数通过定量指标表达各地类的景观格局特征。综合考虑招远市生态特征与自然地理特征，结合景观格局指数所具有的生态学意义，本文选取斑块密度（*PD*）、最大斑块面积（LPI）、景观形状指数（LSI）、边界密度（*ED*）、香农多样性指数（SHDI）、聚集度指数（*AI*）6个指数对研究区土地利用类型景观格局的空间结构、变化特征、破碎程度、形状指数、多样性进行研究（表1）。

表1 景观格局指数及其生态学含义

指数类型	生态学含义
PD	单位面积内某一景观类型所含斑块数量，反映地类景观的分化程度，值越大说明景观破碎化程度越高
ED	从边界形状特征上描述地类景观的破碎化程度
AI	反映地类景观斑块可能的最大邻近度
SHDI	反映生态用地景观异质性，值为0表示生态用地景观由一个斑块组成，值增大表明生态用地景观斑块呈均衡化分布趋势
LPI	有助于确定景观的优势类型，可反映人类活动的方向和强弱
LSI	通过计算区域内某斑块形状与相同面积的圆或正方形之间的偏离程度来测量形状的复杂程度

$$PD=\frac{N_i}{A} \tag{2}$$

式中，A 为研究区总面积；N_i 为斑块数量。

$$ED=\frac{1}{A}\sum_{i=1}^{n}\sum_{i=1}^{n}L_{ij} \tag{3}$$

式中，L_{ij} 为某一地类景观斑块 i 与相邻景观斑块 j 之间的边界长度；n 为地类景观斑块类型数量。

$$AI=2\ln n+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}p_{ij}\ln p_{ij} \tag{4}$$

式中，n 为某一地类景观斑块类型的斑块数量；p_{ij} 为地类景观斑块类型 i 与 j 相邻的概率。

$$\mathrm{SHDI}=-\sum_{i=1}^{m}p_i\ln p_i \tag{5}$$

式中，p_i 为生态用地景观类型 i 的面积占比。

最大斑块面积指数（LPI）：

$$\mathrm{LPI}=\frac{\max(a_1a_2...a_n)}{TA}\times 100\% \quad (6)$$

式中，max为某一斑块类型中最大斑块面积；TA为景观总面积。

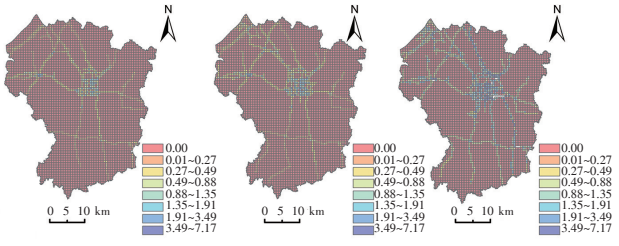
$$\mathrm{LSI}=0.25\sum_{k=1}^{m}e_{ik}^{*}\Big/\sqrt{A} \quad (7)$$

式中，e_{ik}^{*}为斑块类型i和k之间的景观边缘长度，单位为m，包括所有景观边界和涉及类别i的部分；A为景观总面积，单位为km^2。

3　研究结果与分析

3.1　招远市路网结构时空演变分析

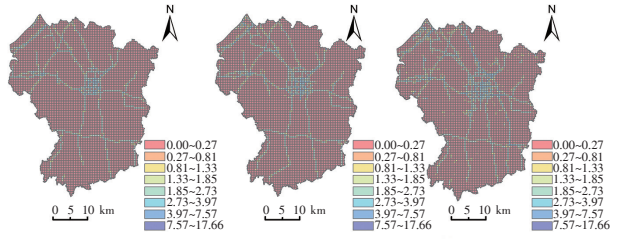
通过上述公式计算得到2009—2018年招远市的道路接近度和路网密度变化。为剖析2009—2018年招远市道路接近度和路网密度的结构变化特征，采用自然断点法将其分为8个等级，以2018年的断点范围为基础，得到道路接近度和路网密度的变化（图1、2），可以看出，道路接近度和路网密度总体呈现由城市中心向周边各乡镇递减的规律，能直观快速地分析其变化。招远市2009年、2014年、2018年道路网长度变化情况见图3，研究区内路网长度由400 km增至625 km，增长幅度为56%。2009—2018年路网变化明显，2009年道路网络结构简单，道路接近度和路网密度较低，只在市中心和城市西部的少量区域达到较高的道路接近度（1.9~7.1）；路网的末端道路接近度为最低等级；85%的道路接近度在0.26~0.48，处于较低水平；路网密度分析结果与道路接近度相似，只有少部分区域路网密度在7.5~17 km/km^2。2018年道路建设完善，路网结构趋于完整，城市中心道路接近度大多在1.9~7.1，路网密度在3.9~17 km/km^2，处于高密度区域。道路接近度和路网密度空间分布特征变化相似，均能体现路网结构变化规律。2009—2014年城市道路网络无较大变化，主要表现在城市中心路网内部结构不断完善丰富，主干道道路变化较小，而次级道路和末级道路逐渐完善，中心城市略微向外扩张；2014—2018年城市中心向外扩张明显，道路网络更加密集，道路接近度显著提高，道路长度由461 km增至625 km，除城市中心道路网络建设外，S19龙青高速的建成也有重要影响。



a 2009年　　b 2014年　　c 2018年

图1　2009—2018年招远市道路接近度变化图

审图号：GS(2019)1822



a 2009年　　b 2014年　　c 2018年

图2　2009—2018年远市路网密度变化图

审图号：GS(2019)1822

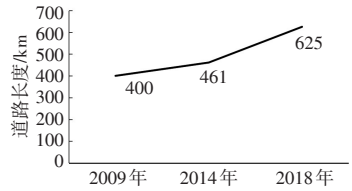


图3　招远市2009—2018年道路长度变化图

2009年、2014年和2018年的路网密度平均值分别为0.27 km/km^2、0.31 km/km^2和0.41 km/km^2，2018年的路网密度平均值比2009年增长了51%；2009年、2014年和2018年的道路接近度平均值分别为0.057、0.082和0.320，2018年的道路接近度平均值大幅增长，其原因在于龙青高速的建成与运行，城市基础设施的完善，居民生活质量的提升，导致道路网络结构密集。

综上所述，2009—2018年招远市道路网络结构在空间上变化明显，主要为城市中心道路网络结构向外扩张、密集程度提升、道路接近度和路网密度变化显著；2009—2014年道路变化内部丰富，向外扩张不明显，变化主要在城市中心区域，2014—2018年城市道路结构内部丰富，向外扩张范围增加，呈螺旋式上升态势；城市西北部临近海域，适宜居住，道路长度增长缓慢，密集度略微提高；城市中心和西部连接更加紧密，道路接近度变化明显，路网密度增长缓慢，总体呈上升趋势；城市南部大部分区域道路在2009—2014年几乎无变化，2014—2018年龙青高速的建成提高了其道路接近度与路网密度。2009—2018年招远市城市路网不断成熟完善，空间结构呈现以城市中部为中心、向东西方向扩张、道路接近度和路网密度逐步上升的态势。

3.2　招远市景观格局变化

由表2可知，草地面积由53.61 km^2减至50.29 km^2，PD由3.48增至3.50，ED由15.3降至14.8，表明草

地景观破碎度上升；区域内斑块数量增加，LSI先降后升，最后总体持平；LPI和*AI*呈下降趋势，LPI极低；SHDI呈上升趋势。耕地面积由856.69 km²减至841.75 km²，减少了1.7%，其原因在于城市建设用地向外扩张，多数占用的是耕地；*PD*逐年增加，*ED*逐渐上升，LPI降低，说明耕地景观呈破碎化态势；LSI逐渐上升，表明耕地土地形状向不规则化发展，形状趋于复杂；*AI*逐渐降低，但2009—2018年*AI*均为在75以上，说明耕地景观连接度较高，总体呈区域划分。耕地景观破碎度升高主要是受农业结构调整和农村道路建设影响，*PD*增加但*AI*较高，且目前农用地多为大面积一体化耕种，形状趋于简单。林地面积由275.85 km²减至271.93 km²，减少了1.4%；*PD*增加，*ED*上升，LPI降低，SHDI升高，景观破碎化严重；LSI升高，*AI*下降。建设用地面积由162.90 km²增至185.70 km²，增加了13%；*PD*和*ED*增加，说明建设景观结构趋于破碎化；LPI上升，说明2009—2018年城市发展迅速，大型建设用地的使用导致建设用地结构趋于破碎化；SHDI上升明显；LSI上升迅速，由75.3增至79.6，说明建设用地迅速增加，为快速提高城市经济水平，建设用地向外扩张不规则，导致结构不完善，城市结构体系建设不健全；*AI*先升后降，总体呈下降趋势，说明城市建设用地扩张迅速，先以小范围建设为中心，后逐渐扩大影响范围。水域面积由68.57 km²降至68.13 km²，几乎无变化；*PD*、*ED*、LSI、*AI*、SHDI变化甚微；2009—2014年LPI由0.35降至0.23，2014—2018年几乎无变化。

表2 2009—2018年招远市各景观类型景观指数

景观类型	年份	*PD*	*ED*	LSI	LPI	*AI*	SHDI
水域	2009	1.957	12.351	86.250	0.359	68.985	0.284
	2014	1.957	12.313	86.143	0.236	68.932	0.290
	2018	1.973	12.315	86.309	0.235	68.861	0.291
建设用地	2009	1.832	16.657	75.360	0.634	82.468	0.474
	2014	1.912	17.658	76.651	1.379	82.902	0.497
	2018	2.099	18.777	79.626	1.427	82.656	0.528
草地	2009	3.485	15.316	120.738	0.016	50.629	0.199
	2014	3.496	14.931	120.660	0.013	49.430	0.211
	2018	3.502	14.814	120.732	0.013	49.107	0.227
耕地	2009	3.646	33.493	116.523	3.202	79.097	0.439
	2014	3.687	33.482	117.014	3.165	78.909	0.471
	2018	3.703	33.395	117.026	3.153	78.856	0.489
林地	2009	0.870	55.899	110.390	24.720	88.769	0.358
	2014	0.931	56.087	111.331	24.579	88.616	0.379
	2018	0.992	56.538	112.690	23.989	88.437	0.385

3.3 路网结构与景观格局相关性分析

道路网络作为深入景观的必要途径，对于人类合理开发利用土地具有重要作用，道路也深深改变着景观格局。道路网络的发展不仅推动了城市化建设的步伐，而且使区域内景观空间结构特征发生了明显改变。近10年招远市发展迅速，现代化设施不断完善，路网不断扩张，改变了建设用地、耕地、草地的空间分布。随着道路接近度和路网密度的增加，景观破碎化程度不断加深。本文利用SPSS软件的Pearson相关系数分析功能分析了研究区道路接近度和路网密度与景观格局指数的相关性。结果表明（表3），相关系数的*p*值均小于0.05，呈现出0.05水平的显著性，说明招远市道路接近度和路网密度与景观格局指数具有显著相关关系；道路接近度和路网密度与*PD*、*ED*、LSI均呈正相关关系，与LPI、*AI*呈显著负相关关系，随着城市网络的不断扩张与丰富，*PD*、*ED*、LSI不断增加，LPI和*AI*不断减少；相较于路网密度，道路接近度与景观格局指数的相关系数更高，二者的相关性更强，说明在表征景观格局变化时，道路接近度比路网密度更加准确，能直观反映城市景观空间结构的特征变化。

表3 2009—2018年招远市道路接近度和路网密度与景观格局指数相关分析系数

类别	年份	*PD*	*ED*	LSI	LPI	*AI*	SHDI
道路接近度	2009	0.225	0.193	0.147	−0.083	−0.105	0.174
	2014	0.284	0.228	0.195	−0.102	−0.260	0.386
	2018	0.317	0.274	0.218	−0.127	−0.340	0.417
路网密度	2009	0.213	0.182	0.141	−0.080	−0.099	0.163
	2014	0.236	0.223	0.187	−0.097	−0.184	0.357
	2018	0.302	0.261	0.209	−0.113	−0.294	0.404

3.4 路网结构时空演变对景观格局的影响

本文通过*PD*、*ED*、LPI、LSI、*AI*、SHDI六个景观指数计算道路接近度叠加土地利用现状前后之差，并通过直方图量化道路网络对景观格局的影响。结果表明，道路接近度叠加后，草地、林地、耕地的*PD*、*ED*同年比呈上升趋势，LSI普遍减小，LPI和*AI*同年比减小（草地景观LPI几乎无变化）；水域景观*PD*叠加前后几乎无变化，*ED*略微升高，LSI无变化，LPI和*AI*同年比略微降低；建设用地景观格局变化最明显，2009年和2014年*PD*同年比约增加5%，2018年增加15%，*ED*增加明显，2018年*ED*增加了1.343，2009年和2014年LSI同年比变化最大，LSI升高了3.230，LPI叠加前后数值增加，但变化规律相同，2009—2014年增幅巨大，上升100%，*AI*同年比数值减小，变化规律相同，先增后减，总体呈上升趋势，SHDI升高但

变化幅度小。在景观类型水平上，*ED*、*PD*、LSI、LPI、*AI*在草地、林地、耕地、建设用地中的变化趋势叠加前后大致相同，水域景观在叠加前后几乎无变化。以建设用地为例（图4），可以看出，道路接近度叠加后进一步加剧了生态用地景观格局的破碎化程度，使得斑块数量增加，LPI减小，聚集度进一步降低。

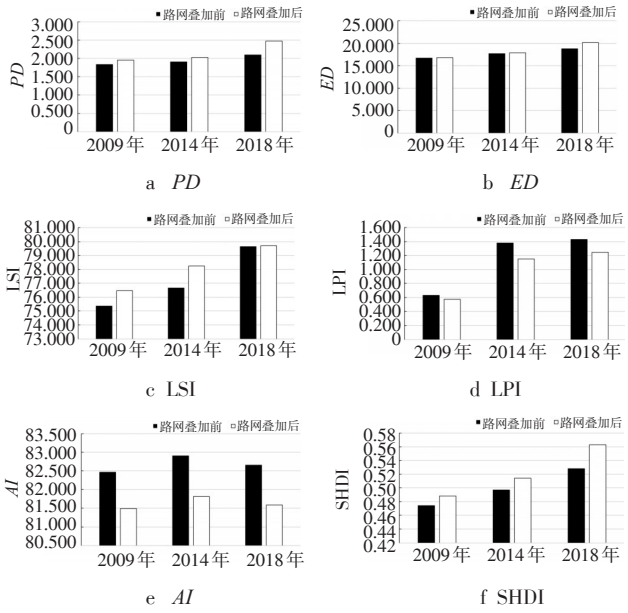


图4　路网叠加前后建设用地景观指数变化

4　结　语

道路网络作为连通城市与各生态景观类型的桥梁，不仅推动了城市的发展，也在改变着周围环境，驱使各类景观的空间结构发生转变。本文以招远市为研究对象，基于sDNA模型和路网密度模型分析了路网结构与景观格局的相关性。①城市道路网络呈螺旋式发展特征，2009—2014年道路变化内部丰富，向外扩张不明显，道路接近度和路网密度增加不明显，主要在城市中心区域；2014—2018年城市道路结构内部丰富，向外扩张范围增加，道路接近度和路网密度显著增加，出现大量高接近度和路网密度区域。②随着城市的不断发展完善，招远市景观总体呈多样化、复杂化、破碎化态势，*PD*、*ED*、LSI、SHDI增加，LPI、*AI*降低，草地、林地、耕地面积减少，呈现破碎化状态，景观优势度降低；大量地类转换为建设用地，建设用地范围扩大，道路网络发展，使之聚集度降低，且道路网络被切割，使得其他景观用地形状不规则。③相较于道路密度，道路接近度表征景观格局变化更准确，因此道路接近度可作为替代道路密度的景观格局变化评价指标。本文的研究思路可为分析道路网络对景观格局的影响提供参考，研究结果可为招远市路网布局规划提供参考，具有一定的理论意义。然而，路网结构是一个不断变化的过程，限于数据的可获取性，本文仅选取了3年基础数据，今后可选取多期路网数据进行耦合性、协调性等全面研究。

参考文献

[1] 宗跃光,周尚意,彭萍,等. 道路生态学研究进展[J]. 生态学报,2003,23(11):2 396-2 405

[2] Zanten B V, Verburg P H, Koetse M J, et al. Preferences for European Agrarian Landscapes: A Meta-analysis of Case Studies[J]. Landscape and Urban Planning,2014(132):89-101

[3] Wang C, Liu S L, Deng L, et al. Road Lateral Disconnection and Crossing Impacts in River Landscape of Lancang River Valley in Yunnan Province, China[J]. Chinese Geographical Science,2014,24(1):28-38

[4] Shi H ,Shi T G, Yang Z P, et al. Effect of Roads on Ecological Corridors Used for Wildlife Movement in a Natural Heritage Site[J]. Sustainability,2018,10(8):45-49

[5] Barber C P, Cochrane M A, Souza C M, et al. Roads, Deforestation, and the Mitigating Effect of Protected Areas in the Amazon[J]. Biological Conservation,2014,177:203-209

[6] Zhao S M, Ma Y F, Wang J L, et al. Landscape Pattern Analysis and Ecological Network Planning of Tianjin City[J]. Urban Forestry and Urban Greening,2019,46 (2):126 479

[7] 宋冰洁,周忠学. 西安都市圈道路网络化对景观格局的影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2017,47(5):1 521-1 532

[8] 杨思,孔德良. 基于道路网络特征的建设用地扩张及其对林地景观的影响:以深圳市为例[J]. 生态环境学报,2012,21(2):286-292

[9] 张景华,封志明,姜鲁光,等. 道路干扰对澜沧江流域景观格局的影响[J]. 自然资源学报,2013,28(6):969-980

[10] 牟凤云,杨猛,罗玲,等. 山区路网格局与土地利用协调效应研究:以重庆市巫山县为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版),2020,37(5):35-44

[11] 蔡雪娇,吴志峰,程炯. 基于核密度估算的路网格局与景观破碎化分析[J]. 生态学杂志,2012,31(1):158-164

[12] 谢双玉,张琪,龚箭,等. 城市旅游景点可达性综合评价模型构建及应用:以武汉市主城区为例[J]. 经济地理,2019,39(3):232-239

[13] 陈驰,李伯华,袁佳利,等. 基于空间句法的传统村落空间形态认知:以杭州市芹川村为例[J]. 经济地理,2018,38(10):234-240

[14] 古恒宇,孟鑫,沈体雁,等. 基于sDNA模型的路网形态对广州市住宅价格的影响研究[J]. 现代城市研究,2018(6):2-8

[15] 古恒宇,沈体雁,周麟,等. 基于GWR和sDNA模型的广州市路网形态对住宅价格影响的时空分析[J]. 经济地理,2018,38(3):82-91

[16] 赵芳,卢涛. 道路扩展对青藏高原东缘土地利用及景观格局的影响[J]. 生态科学,2017,36(4):146-151